ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА КОМПОЗИТОВ ВОЛОКНИСТОГО СТРОЕНИЯ ПРИ ПРЕССОВАНИИ

EXPERIMENTALLY-ANALYTICAL METHOD FOR PREDICTION QUALITY OF COMPOSITES OF FIBROUS STRUCTURE AT EXRUSION

Д.И. Крючков, А.Г. Залазинский
Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия
kru4koff@bk.ru

Abstract

The experimentally-analytical method is offered for prediction quality composite of fibrous structureat extrusion processes. The mathematical model is developed for definition damage fibers and a matrix. The offered method considers inhomogeneity at macro level, i.e. the certain scheme apply depending on kind composite. The algorithm developed to solve problem in a hybrid modeling complex. The program module with the interface for Abaqus created to definite damage of components of a composite on the basis of the developed mathematical model.

В промышлености широко используют композитные проводники. Разнообразие конструкций существующих проводников и разработка новых ставит задачу исследования при изготовлении и поиска эффективных технологий увеличивающих выпуск и повышающих качество готовых изделий. Определение оптимальных технологических условий изготовления изделий высокого качества из неоднородных материалов, к которым относят композиционные материалы волокнистого строения, является сложной прикладной задачей. Решение такой сложной задачи требует привлечение современных информационных технологий. Средства инженерного анализа становятся необходимым атрибутом проектирования. Композиты волокнистого строения являются сложным объектом исследования.

Развиваются модели, основанные на многоуровневом подходе [1]. На каждом масштабном уровне (микроуровень и макроуровень) строится своя структурная модель: рассматривается некоторый объем материала, в пределах которого проводится осреднение его свойств. Это приводит к необходимости создания подходовпредполагающих совместное использование различных методов решения и использование одновременно двух и более различных прикладных пакетов. Освоение сложных программных пакетов, в объеме необходимом для решения практических задач, занимает значительное время. Выходом является создание программных оболочек с интерфейсом использующие для вычислений ресурсы прикладных пакетов. Это освобождает конечного пользователя от прохождения всего технологического цикла работы с пакетами.

Целью работы является разработкаэкспериментально-аналитического метода исследования напряжённо-деформированного состояния и прогнозирования качества при пластической деформации металлических композитов волокнистого строения.Суть предлагаемого метода заключается в том, что вначале определяется усредненное напряженно-деформированное состояние с использованием
метода конечных элементов на макроуровне. При этом учитывается вид композита, применяется подходящая схема композита (см. ниже). Затем выбирается элемент и рассматривается на микроуровне.По математической модели, вдоль траектории движения узлов конечного элемента, рассчитывается напряженное состояние и характер поврежденности волокна и основы.Из поставленной цели вытекают следующие задачи:

– разработать математическая модель определения поврежденности ω компонентов композита в соответствии с феноменологической теорией разрушения В.Л. Колмогорова;

– разработать программное обеспечение, использующее математическую модель и систему инженерного анализа.

Для прогнозирования качества композита при прессовании критерием оценки выбрали накопление поврежденности ω. Напряженное состояние волокна и основы определяется из деформированного состояния. Деформированное состояние находятся из эксперимента имитационного моделирования. Принимается схема композита, представленная на рис. 1 (*а*). Свойства материала задаются усреднено, т.е. материал, содержащий волокна в основе, считается изотропным. Из литературы [2] известно, что наибольшую поврежденность имеет волокно на границе раздела материала основы и волокна. Поэтому чтобы оценить качество изделия достаточно рассчитать поврежденность этого волокна. На рис. 1 (*б*) представлена структура композита и определено волокно, для которого рассчитывается поврежденность. Значение поврежденности определяется из напряженного состояния вдоль линии тока волокна рис.1 (*в*) на каждом этапе нагружения. При моделировании траектории движения узлов конечных элементов совпадают с линиями тока волокон. Поэтому степень деформации и компонентов скоростей деформации, а также усредненных компонентов напряжений определяют вдоль траекторий движения конечного элемента, на границе раздела материалов “основа” и “основа+волокна”. Этапы нагружения представляют собой стадии прохождения конечного элемента через рабочий инструмент.

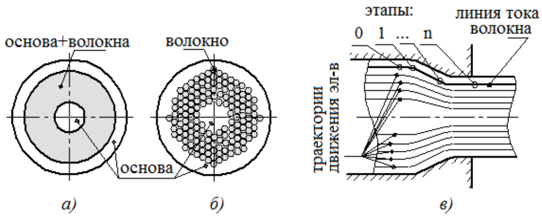

Рис. 1. *а)* – схема композита, *б)* – модель композита вид с торца, *в)* – разрез вдоль композита

Рассмотрим метод определения напряженного состояния и поврежденности волокна и определим математическую модель. Принимается несколько гипотез: во-первых постоянство объема, а во вторых, отсутствие сдвига волокна относительно основы. Рассмотрим область (см. рис. 2 *а*) на границе раздела основы и волокна. Для определения напряженного состояния волокна на микроуровне в этой области выделим элементарный объем, содержащий как материал основы, так и волокна. В объеме этот элемент представляет собой элементарную площадку в виде кубика. Определим в систему координат (1 – *r*, 2 – *z*, 3 – *φ*), и направим компоненты напряжений на этой площадке в соответствии с ней. В соответствии с принятыми гипотезами компонента σ_{11} не терпит разрыва, т.е. одинаково, что для материала основы, что для волокна и равна напряжению на макроуровне. Для каждого этапа нагружения решается система уравнений определения напряженного состояния для волокна и основы. Этап 0 соответствует начальному состоянию, последний этап – выходу материала из калибрующего пояска.

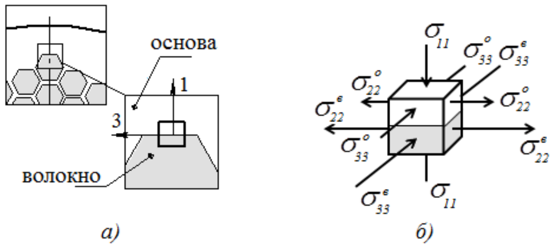

Рис. 2*а)* – область композита, *б)* – элементарный объем

Математическая модель определения напряжений основывается на механике деформируемого твердого тела. Предполагается что, при пластической деформации справедливо следующее тензорное соотношение:

$$D_\sigma = \frac{2}{3}\frac{\sigma_i}{\xi_i} D_\xi , \tag{1.1}$$

где $D_\sigma -$девиатор напряжений, $D_\xi -$девиатор скоростей деформации, $\sigma_i -$ интенсивность напряжений, $\xi_i -$ интенсивность скоростей деформации.

В случае деформации несжимаемых материалов $D_\xi = T_\xi$, где $T_\xi -$ тензор скоростей деформации. Образуется система уравнений для волокна и для основы, используются далее по тексту верхние индексы: *в* – волокно, *о* – основа:

$$\begin{cases} \sigma_{11}^{в} = \sigma_{ср}^{в} + \dfrac{2}{3}\dfrac{\sigma_i^{в}}{\xi_i^{в}}\xi_{11}^{в} \\ \sigma_{22}^{в} = \sigma_{ср}^{в} + \dfrac{2}{3}\dfrac{\sigma_i^{в}}{\xi_i^{в}}\xi_{22}^{в} \\ \sigma_{33}^{в} = \sigma_{ср}^{в} + \dfrac{2}{3}\dfrac{\sigma_i^{в}}{\xi_i^{в}}\xi_{33}^{в} \\ \tau_{12}^{в} = \dfrac{1}{3}\dfrac{\sigma_i^{в}}{\xi_i^{в}}\xi_{12}^{в} \end{cases} \begin{cases} \sigma_{11}^{o} = \sigma_{ср}^{o} + \dfrac{2}{3}\dfrac{\sigma_i^{o}}{\xi_i^{o}}\xi_{11}^{o} \\ \sigma_{22}^{o} = \sigma_{ср}^{o} + \dfrac{2}{3}\dfrac{\sigma_i^{o}}{\xi_i^{o}}\xi_{22}^{o} \\ \sigma_{33}^{o} = \sigma_{ср}^{o} + \dfrac{2}{3}\dfrac{\sigma_i^{o}}{\xi_i^{o}}\xi_{33}^{o} \\ \tau_{12}^{o} = \dfrac{1}{3}\dfrac{\sigma_i^{o}}{\xi_i^{o}}\xi_{12}^{o} \end{cases}, \tag{1.2}$$

где $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \tau_{12} -$ компоненты напряжений, $\xi_{11}, \xi_{22}, \xi_{33}, \xi_{12} -$ компоненты скоростей деформации, $\sigma_{ср} -$среднее нормальное напряжение.

В соответствии с принятыми гипотезами компонента девиатора напряжений действующего в направлении 1 на элементарный объем (рис. 2 *б*), одинаково для волокна и основы, и равно компоненте девиатора напряжений на макроуровне. Примем, чтодеформация элементарного объема равна деформации элемента на макроуровне.

$$\begin{cases} \sigma_{11} = \sigma_{11}^{в} = \sigma_{11}^{o} \\ \xi_{11} = \xi_{11}^{в} = \xi_{11}^{o} \\ \xi_{22} = \xi_{22}^{в} = \xi_{22}^{o} \\ \xi_{33} = \xi_{33}^{в} = \xi_{33}^{o} \\ \xi_{12} = \xi_{12}^{в} = \xi_{12}^{o} \end{cases} \tag{1.3}$$

Интенсивность скоростей деформации рассчитывается по следующей формуле:

$$\xi_i = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{(\xi_{11}-\xi_{22})^2+(\xi_{22}-\xi_{33})^2+(\xi_{33}-\xi_{11})^2+\frac{3}{2}\xi_{12}^2} = \xi_i^в = \xi_i^о$$

Накопленную частицей материала пластическую деформацию в течение отрезка времени $0 \le \tau \le t$, рассчитывается вдоль траектории движения по формуле

$$\varepsilon_i = \int_0^t \xi_i d\tau, \quad (1.4)$$

Причем для волокна и основы степень деформации ε_i одинакова:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_i^в = \varepsilon_i^о \; (1.5)$$

Интенсивность напряжений σ_i при пластической деформации численно равна истинному сопротивлению деформации σ_s и однозначно связана с интенсивностью деформации ε_i. Для каждого материала определяется по формулам, полученным из диаграмм истинных напряжений и деформаций:

$$\begin{cases} \sigma_s^в = A^в + B^в \varepsilon_i^{(n)} = \sigma_i^в \\ \sigma_s^о = A^о + B^о \varepsilon_i^{(n)} = \sigma_i^о \end{cases}, \quad (1.6)$$

гдеA, B, n – эмпирические коэффициенты кривой материала.

Система уравнений (1.2) с учетом (1.3-1.6) становиться определенной. Для каждого этапа нагружения определяется $\sigma_{ср}$ волокна и основы. Затем определяется коэффициент напряженного состояния k на этапах для волокна и основы по формуле:

$$\begin{cases} k_в = \dfrac{\sigma_{11}^в + \sigma_{22}^в + \sigma_{33}^в}{\sqrt{3}\sigma_i^в} \\ k_о = \dfrac{\sigma_{11}^о + \sigma_{22}^о + \sigma_{33}^о}{\sqrt{3}\sigma_i^о} \end{cases} \quad (1.7)$$

Степень деформации сдвига Λ — величина, отличающаяся от ε_i постоянным множителем. Так как интенсивность деформации волокна и основы одинакова, то и степень деформации сдвига волокна и основы будут равны.

$$\Lambda = \sqrt{3} \cdot \varepsilon_i \; (1.8)$$

Для описания процессов разрушения необходимо знать диаграмму пластичности материала, которая связывает величину предельной деформации сдвига Λ_P от коэффициента напряженного состояния k. Для каждого этапа нагружения величина предельной деформации сдвига определяется по формуле:

$$\begin{cases} \Lambda^в{}_P = \Lambda^в{}_P(k_в) \\ \Lambda^о{}_P = \Lambda^о{}_P(k_о) \end{cases} \quad (1.9)$$

Для каждого этапа деформации величина поврежденности металла ω, в соответствии с феноменологической теорией разрушения В.Л. Колмогорова, определяется по формуле:

$$\begin{cases} \omega_в = \dfrac{\Lambda}{\Lambda^в{}_P} \\ \omega_о = \dfrac{\Lambda}{\Lambda^о{}_P} \end{cases} \quad (1.10)$$

Основные этапы решения задачи определения напряженного состояния и поврежденности волокна композита волокнистого строения следующие:

1. Определение коэффициентов уравнений описывающие, модель материалов по кривым диаграмм пластичности и истинных напряжений и деформаций для основы, волокон и усредненного материала содержащего волокна в основе (“основа+волокна”), сохранение в базу данных;
2. Ввод в систему инженерного анализа данных о свойствах заготовки, геометрии инструмента и заготовки, граничных условиях;
3. Расчет методом конечных элементов заготовки с использованием схемы композита (рис. 1 *а*), определение напряженно-деформированного состояния на макроуровне;
4. Сохранение данных о деформированном состоянии определенного конечного элемента на границе материалов “основа” и “основа+волокна”;
5. Расчет пути нагружения и поврежденности для волокна и основы, по разработанной математической модели на микроуровне, используя данные о деформированном состоянии конечного элемента.

Для реализации экспериментально-аналитического метода в гибридном моделирующем комплексе [3]разработана оболочка, представляющая собой программный модуль системы Abaqus с интерфейсом (рис. 3) и взаимодействующим с ним подпрограммой определения поврежденности волокна и основы по разработанной математической модели.

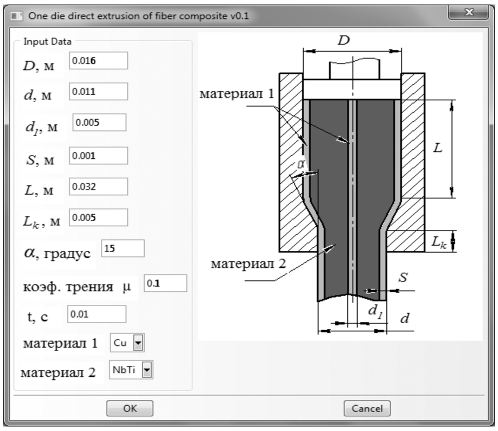

Рис. 3 Интерфейс программного модуля

Заключение. Предложен экспериментально-аналитического метод исследования напряжённо-деформированного состояния и прогнозирования качества при пластической деформации металлических композитов волокнистого строения. Разработана математическая модель определения поврежденности волокон и основы композита. Предлагаемый метод решения отличается от предложенных ранее тем, что учитывает неоднородность на макроуровне, т.е. учитывается вид композита и применяется подходящая схема. Разработаны алгоритм решения задач инженерного анализа. Для реализации предложенного метода разработаны подпрограммы и введены в гибридный моделирующий комплекс, предназначенный дляанализа и оптимизации процессов пластического деформирования неоднородных материалов.

Список литературы

1. Сидоренко Ю.Н., Шевченко Н.А. Прогнозирование механических свойств биометаллического материала на основе многоуровневой математической модели. // Физическая мезомеханика. 1999, т.2, № 1-2, с. 37-41.
2. Залазинский А.Г. Пластическое деформирование структурно-неоднородных материалов. Екатеринбург. УрО РАН, 2000. 491 с.
3. Крючков Д.И., Залазинский А.Г. Гибридный моделирующий комплекс для оптимизации процессов прессования неоднородных материалов. // Вестник компьютерных и информационных технологий, 2013. № 9,с. 22-28.